

OPTIMASI CELAH PITA OPTIK OPAL DAN *CORE-SHELL* OPAL

Muldarisnur

Jurusan Fisika, FMIPA – Universitas Andalas

Kampus Limau Manis, Pauh, Padang 25163

e-mail : mulda.muldarisnur@gmail.com

ABSTRAK

Kristal fotonik merupakan *platform* ideal untuk pengembangan devais optik terintegrasi. Interaksi antara foton dengan modulasi periodik pada indeks bias mengakibatkan terbentuknya celah pita optik yang memberi peluang untuk mengontrol perambatan dan emisi cahaya serta interaksinya dengan bahan. Kristal fotonik tiga dimensi biasanya difabrikasi menggunakan teknik *self-assembly* karena selain murah dan mudah dilakukan, teknik ini dapat digunakan untuk membuat kristal dengan berbagai periodisitas. Opal hanya memiliki celah pita optik pada arah tertentu saja (*stop band*) tapi dapat dimodifikasi atau digunakan sebagai *template* untuk inverse opal yang memiliki celah pita optik dalam segala arah (*omnidirectional*). Lebar *stop band* dari opal dan *core-shell* opal akan dioptimasi dengan memvariasikan indeks bias medium dan struktur kristal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa opal dengan partikel tidak saling bersentuhan memiliki *stop band* terlebar dan memiliki potensi untuk digunakan sebagai devais optik.

Kata Kunci : Kristal fotonik, opal, *core-shell* opal, celah pita optik, *plane-wave expansion method*.

ABSTRACT

Photonic crystals, periodically arranged materials, have been intensively investigated currently due to their interesting optical properties that allow for fabrication of highly-integrated and high-performance optical devices. Bragg diffraction at the periodic interfaces of two different materials results in the formation of optical band gap. Despite having higher accuracy and better control in the fabrication processes, lithographic techniques are slow and expensive. Therefore, self-assembly of colloidal particles to form the so-called artificial opals becomes the most widely adapted approach for fabrication of three-dimensional photonic crystals. Opals possess a partial or stop band only, but they can be modified or used to form inverse opals with a complete band gap. In this work, the size of the stop band of opals and core-shell opals will be numerically optimized by using plane wave expansion method. We found that non close-packed opals have a large stop band that is suitable for application in optical devices.

Keywords : photonic crystals, opals, core-shell opal, optical band gap, plane wave expansion method.

1. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi optik sekarang ini masih bergantung pada piranti elektronik untuk melakukan fungsi seperti penguatan dan *routing* sinyal. Komponen elektronik sayangnya bersifat disipatif dan tidak mampu mengimbangi kecepatan transmisi sinyal pada serat optik (Bagad, 2008). Hal ini mendorong pengembangan sistem komunikasi yang sepenuhnya menggunakan piranti optik. Integrasi berbagai piranti optik yang berfungsi sebagai sumber cahaya, pemandu gelombang, *routing*, dan penguatan sinyal sayangnya tidak dapat dilakukan menggunakan sistem optik konvensional berdasarkan prinsip pemantulan dan pembiasan.

Pelemahan sinyal dan difraksi pada sistem optik konvensional dapat diatasi dengan menggunakan struktur periodik yang dikenal sebagai kristal fotonik (Yablonovitch, 1987) dan (John, 1987). Kristal fotonik adalah struktur yang memiliki modulasi indeks bias secara periodik pada skala panjang gelombang cahaya. Kristal fotonik memiliki celah pita optik yang memungkinkan manipulasi perambatan cahaya dan kontrol atas interaksi cahaya dengan bahan. Di dalam kristal fotonik, cahaya dapat dipandu tanpa pelemahan intensitas dan emisi spontan dapat dihilangkan. Kristal fotonik dipercaya merupakan *platform* ideal untuk merealisasikan *all-optical chips* (Joannopoulos dkk., 2008).

Sementara piranti optik dari kristal fotonik satu dan dua dimensi sudah mendekati tahap komersialisasi, struktur periodik tiga dimensi berkualitas tinggi masih sulit difabrikasi. Meskipun sangat akurat, teknik litografi sangat mahal, lambat dan tidak akurat ketika jumlah lapisan bertambah. Oleh karena itu, *self-assembly* partikel koloid membentuk kristal yang dikenal dengan opal menjadi pendekatan utama untuk fabrikasi struktur periodik tiga dimensi karena mudah dilakukan, cepat, dan murah.

Dalam makalah ini, lebar celah pita optik opal dan *core-shell* opal akan dioptimasi secara numerik dengan memvariasikan ukuran partikel koloid dan indeks bias medium.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sifat optik kristal fotonik dapat dijelaskan dengan menggunakan konsep fisika zat padat. Perambatan foton di dalam medium dengan modulasi indeks bias periodik mirip dengan gerakan elektron di bawah pengaruh distribusi potensial atom. Cahaya polikromatik merambat tanpa gangguan di dalam kristal fotonik karena efek hamburan saling menghilangkan kecuali untuk cahaya yang memenuhi kondisi Bragg (Johnson dan Joannopoulos, 2002). Interaksi kuat antar cahaya dan struktur periodik mengakibatkan terjadinya interferensi destruktif cahaya yang dipantulkan pada bidang batas antara dua medium yang berbeda. Interferensi destruktif menyebabkan terbentuknya celah pita optik dimana cahaya dengan rentang frekuensi tertentu tidak dapat merambat atau dihasilkan dalam kristal fotonik. Posisi celah pita kristal fotonik tergantung pada struktur kristal, periodisitas, dan kontras indeks bias antara material penyusunnya.

Perambatan cahaya dalam kristal fotonik dapat dijelaskan menggunakan persamaan Maxwell. Persamaan gelombang yang merambat diturunkan dari persamaan Maxwell dengan melakukan prosedur dekoupling medan listrik dan medan magnet, sehingga dihasilkan persamaan:

$$\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

dimana \mathbf{E} , \mathbf{H} , c , dan $\varepsilon(\mathbf{r})$ berturut-turut adalah medan listrik, medan magnet, cepat rambat cahaya dan distribusi spasial konstanta dielektrik.

Persamaan (2.1) dan (2.2) dapat memiliki kebergantungan spasial dan temporal yang kompleks. Untungnya, sifat linearitas Persamaan Maxwell membuat solusi spasial dan

temporal dapat dipisahkan (*separable*). Variasi medan terhadap waktu dapat diasumsikan bersifat harmonik dengan frekuensi ω yang memenuhi *ansatz*:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})e^{i\omega t} \quad (2.4)$$

Pilihan solusi harmonik ini menyederhanakan perhitungan matematis tanpa mengurangi generalitas solusi yang didapatkan. Substitusi medan harmonik menghasilkan persamaan gelombang dalam kristal fotonik:

$$\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.6)$$

Semua parameter fisis kristal fotonik terkandung di dalam distribusi konstanta dielektrik, $\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r} + \mathbf{R})$ dimana \mathbf{R} adalah periodisitas kisi kristal.

3. METODE

Persamaan (2.5) dan (2.6) dapat diselesaikan dalam domain frekuensi dengan menggunakan *plane-wave expansion method* (Ho dkk., 1990). Berdasarkan Teorema Bloch, sifat periodik konstanta dielektrik mensyaratkan bahwa solusi dari Persamaan (2.5) dan (2.6) berupa gelombang datar yang dimodulasi dengan fungsi periodik. Teorema Bloch mengimplikasikan bahwa medan elektromagnetik di dalam kristal dapat ditentukan jika kita mengetahui distribusinya di dalam satu unit sel. Periodisitas dalam ruang nyata berarti pula periodisitas dalam ruang resiprok, sehingga hanya hubungan dispersi di dalam zona Brillouin (BZ) pertama saja yang perlu dihitung. Lebih lanjut, kita tidak perlu melakukan perhitungan pada setiap titik di dalam BZ karena hubungan dispersi memenuhi simetri grup titik (*point group symmetry*) kisi yang meliputi rotasi, translasi, dan inversi. Daerah terkecil yang tidak dapat dihubungkan dengan titik simetri disebut dengan *irreducible BZ* (IBZ).

Perhitungan struktur pita pada setiap titik pada kisi resiprok di dalam IBZ harus dilakukan jika kita ingin menjelaskan perambatan cahaya dalam kristal fotonik. Untuk melihat eksistensi celah pita optik, perhitungan hubungan dispersi hanya perlu dilakukan sepanjang lintasan yang menghubungkan titik-titik simetri tinggi pada sudut IBZ sudah cukup karena titik ekstrim (maksimum dan minimum) berada pada titik-titik tersebut. Perhitungan struktur pita opal dan *core-shell* opal akan dilakukan dengan menggunakan *software* MIT Photonic Bands (Johnson dan Joannopoulos, 2001) dengan menggunakan $32 \times 32 \times 32$ gelombang datar.

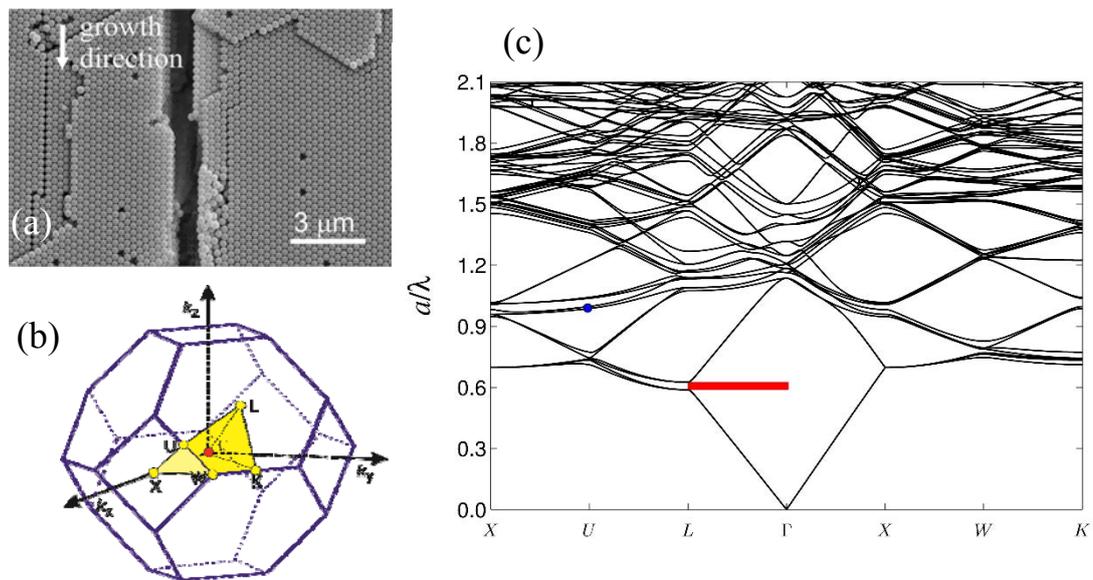
4. HASIL DAN DISKUSI

Berikut adalah hasil optimasi lebar *stop band* untuk opal dan *core-shell* opal.

4.1 Opal

Struktur pita optik opal sepanjang lintasan yang menghubungkan titik simetri tinggi ditampilkan pada Gambar 4.1(c). Opal dengan struktur *fcc* diasumsikan terbuat dari partikel *polystyrene* dengan indeks bias 1,59 dan ruang diantara partikel adalah udara

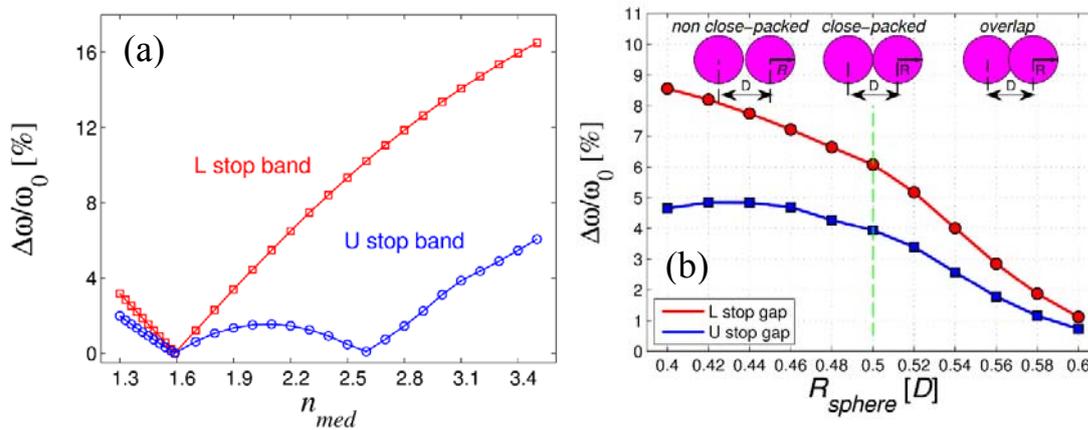
dengan indeks bias ($n_{med} = 1$). Struktur pita optik ditampilkan dalam frekuensi ternormalisasi (a/λ), dimana a dan λ berturut-turut adalah konstanta kisi dan panjang gelombang cahaya. Konstanta kisi struktur kristal fcc adalah $\sqrt{2}d$, dimana d diameter partikel.



Gambar 4.1. (a) Gambar *scanning electron microscope* dari *polystyrene* opal (Muldarisnur dan Marlow, 2011), (b) *Brillouin zone* kristal *fcc* opal dimana IBZ ditandai dengan daerah berwarna kuning (Muldarisnur dkk., 2012), dan (c) struktur pita dari opal.

Ada dua celah pita optik parsial (*stop band*), yaitu pada titik L dan titik U . *Stop band* pada titik L terbentuk antara pita ke-2 dan ke-3, sedangkan dan pada titik U antara pita ke-7 dan ke-8. Celah pita optik opal pada titik L ditunjukkan dengan arsir berwarna merah, sedangkan pada titik U ditunjukkan oleh lingkaran berwarna biru. Berdasarkan hasil SEM, opal cenderung memiliki bidang (111) sejajar dengan substrat, sehingga secara eksperimental arah $\Gamma-L$ berkaitan dengan sinar datang tegak lurus lapisan tipis opal.

Lebar *stop band* pada titik L dan U untuk opal dari *polystyrene* sebagai fungsi indeks bias medium sekitar dan jari-jari partikel diperlihatkan pada Gambar 4.2. lebar celah pita optik dinormalisasi dengan frekuensi tengah dari *stop band*.



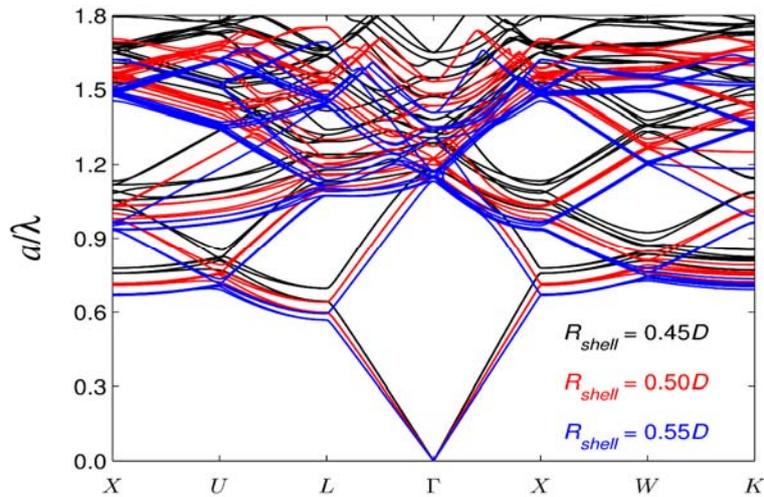
Gambar 4.2. Lebar *stop band* pada titik *L* dan *U* sebagai fungsi: (a) indeks bias medium, dan (b) jari-jari partikel. Jari-jari partikel dinormalisasi dengan jarak pusat-ke-pusat, D , dari partikel berdekatan.

Lebar *stop band* sangat bergantung pada indeks bias ruang diantara partikel (medium). Semakin besar kontras indeks bias antara partikel dan medium, semakin lebar pula *stop band*. Pada saat indeks bias partikel sama dengan indeks bias medium, *stop band* pada titik *L* dan *U* menghilang karena opal pada prinsipnya tidak lebih dari medium dielektrik homogen. Lebar *stop band* pada titik *L* dan *U* memiliki kebergantungan yang berbeda terhadap indeks bias medium. *Stop band* pada titik *U* memiliki dua titik minimum, yaitu pada saat saat $n_{med} = 1,59$ dan $2,6$. Munculnya minimum pada saat $n_{med} = 2,6$ berkaitan dengan panjang lintasan optik yang sama di dalam partikel dan medium untuk modus optik frekuensi tinggi.

Gambar 4.2(b) menunjukkan bahwa *stop band* paling lebar diperoleh pada saat opal terbentuk dari partikel yang tidak saling kontak satu sama lain (*Non close-packed* opal) yaitu saat diameter partikel lebih kecil dari jarak pisah antara partikel berdekatan. *Non close-packed* opal terbentuk pada proses deposisi opal dimana ruang diantara partikel masih terisi oleh pelarut (Muldarisnur dan Marlow, 2014). Ketika pelarut menguap, partikel makin mendekat satu sama lain sehingga partikel saling kontak dan membentuk *close-packed* opal. Pada saat pelarut menguap meninggalkan opal, gaya van der Waals dan tegangan permukaan larutan menekan partikel sehingga mengakibatkan partikel sedikit terdeformasi (*overlap*). Lebar *stop band* berkurang secara drastis ketika deformasi makin besar karena penurunan kontras indeks bias dan jumlah bidang batas antara dua medium berbeda.

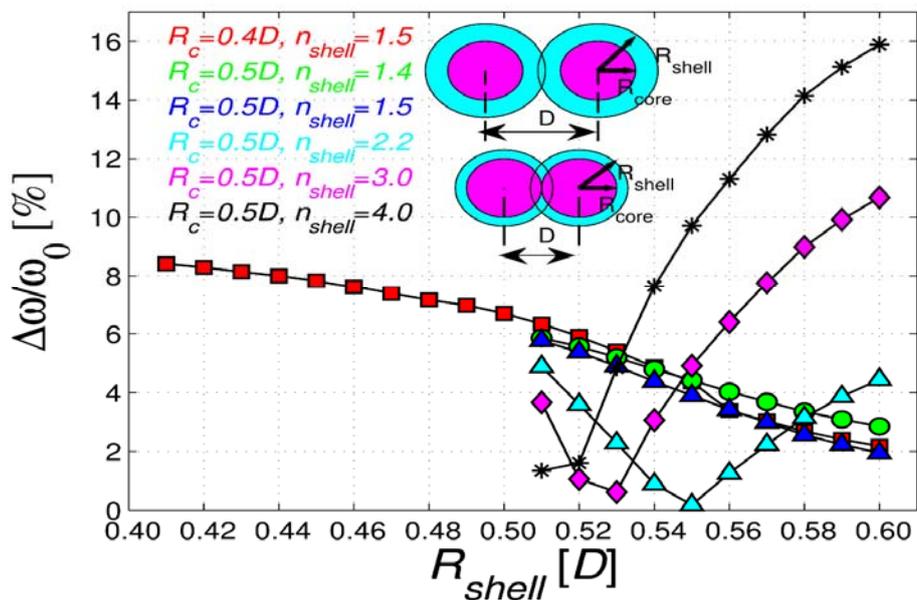
4.2 Core-Shell Opal

Pada sub-bagian sebelumnya sudah ditunjukkan bahwa *stop band* opal dengan partikel yang tidak bersentuhan satu sama lain jauh lebih lebar. Sistem *non close-packed* opal sulit dipertahankan karena terjadinya penguapan pelarut. Hal ini dapat diatasi dengan menumbuhkan *core-shell* opal. Secara eksperimen, hal ini dapat direalisasikan dengan menggunakan *core-shell* partikel atau dengan mengevaporasi material lain untuk membentuk *shell* pada opal yang sudah terbentuk.



Gambar 4.3. Struktur pita optik *core-shell* opal dengan variasi jari-jari *shell*. Jari-jari *shell* dinormalisasi dengan jarak pisah antara partikel berdekatan (D). *Close-packed* opal berkaitan dengan jari-jari $R = 0,5 D$. Jari-jari *core* diasumsikan sebesar $0,4 D$.

Struktur pita optik dari *core-shell* opal diperlihatkan pada Gambar 4.3. Secara umum struktur pita ini sangat mirip dengan struktur pita opal biasa, perbedaannya hanya pada frekuensi *stop band*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lebar dan frekuensi *stop band* berkurang dengan makin besarnya jari-jari *shell*. Kecenderungan perubahan lebar *stop band* diperlihatkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Lebar *stop band* pada titik L sebagai fungsi jari-jari *shell*. Definisi dan nilai dari jari-jari *core* (R_c), jari-jari *shell* (R_{shell}), jarak pisah antar partikel (D) dan indeks bias *shell* (n_{shell}) diberikan di dalam *inset*.

Gambar 4.4 menunjukkan lebar *stop band* untuk dua kondisi berbeda, yaitu jari-jari *core* lebih kecil dan sama dengan jarak pisah antar partikel. Ada beberapa hal yang dapat disimpulkan, yaitu: (1) Jari-jari *core* tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap lebar *stop band*, (2) lebar *stop band* untuk $n_{shell} < n_{core}$ berkurang dengan membesarnya R_{shell} (3) lebar *stop band* untuk $R_c = 0,5 D$ bergantung secara signifikan pada n_{shell} dimana semakin tinggi n_{shell} semakin lebar *stop band*, (4) terdapat nilai R_{shell} dimana lebar *stop band* bernilai minimum.

Berkurangnya lebar *stop band* dengan makin besarnya jari-jari *shell* berkaitan dengan penurunan kontras indeks bias. Tren yang sangat berbeda terlihat ketika opal diberi *shell* dengan indeks bias lebih tinggi dibanding dengan indeks bias *core* ($n_{core} = 1,59$). Hal ini dikarenakan meningkatnya kontras indeks bias ketika ukuran *shell* diperbesar. Titik minimum lebar *stop band* berkaitan dengan samanya lintasan optik pada medium yang berbeda.

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa penggunaan partikel *core-shell* tidak efektif untuk memperlebar *stop band*. Pendekatan yang lebih tepat adalah dengan menumbuhkan opal dengan partikel biasa (homogen) dan kemudian mengevaporasi material yang memiliki indeks bias tinggi seperti logam untuk membentuk *shell*. Seandainya *shell* terbuat dari bahan yang *deformable* sehingga jari-jarinya dapat dikontrol dari luar, maka muncul dan tertutupnya *stop band* dapat digunakan untuk membuat *switch* atau transistor optik.

5. KESIMPULAN

Lebar *stop band* dapat dikontrol dengan memvariasikan *filling fraction* dan kontras indeks bias antara partikel dengan medium sekitar. Opal dengan *non close-packed* partikel memiliki *stop band* lebih lebar dibandingkan dengan dua kondisi *packing* lainnya. Ukuran *core* tidak terlalu mempengaruhi lebar *stop band* pada *core-shell* opal. Untuk mendapatkan opal dengan *stop band* terlebar, sebaiknya dilakukan deposisi opal menggunakan partikel homogen dan kemudian material dengan indeks bias tinggi dievaporasikan untuk membentuk *shell* setebal mungkin. Munculnya minimum pada lebar *stop band* membuat *core-shell* opal potensial untuk digunakan sebagai *switch* atau transistor optik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bagad, S., 2008, *Optical Fiber Communication*, Technical Publications, Pune.
2. Ho, K.M., Chan, C.T, dan Soukoulis, C.M., 1990, Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 65, hal. 3152.
3. John, S., 1987, Strong Localization of Photons in certain Disordered Dielectric Superlattices, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58: 2486-2489.
4. Joannopoulos, J.D., Johnson, S.G., Winn, J.N., dan Meade, R. D., 2008, *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, New Jersey.
5. Johnson S.G. dan Joannopoulos J.D., 2002, *Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice*, Kluwer Academic Publisher, Boston.
6. Johnson S.G. dan Joannopoulos J.D., 2001, Block iterative frequency domain methods for Maxwell's Equation in a planewave basis, *Optics Express*, Vol. 8: 173-190.
7. Muldarisnur, M. dan Marlow, F., 2011, Opal Films Made by the Capillary Deposition Method: Crystal Orientation and Defects, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 11: 414-418.

8. Muldarisnur, M., Popa, I., dan Marlow, F., 2012, Angle-Resolved Transmission Spectroscopy of Opal Films, *Phys. Rev. B*, Vol. 86, hal. 024105.
9. Muldarisnur, M. dan Marlow, F., 2014, Observation of nano-dewetting in colloidal crystal drying, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 53: 8761–8764.
10. Yablonovitch, E., 1987, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58: 2059–2062.